

Д. В. Борисюк, к. т. н.
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ДІАГНОСТУВАННЯ
ТУРБОКОМПРЕСОРА ЯМЗ-650.1118011

Концепція розвитку сучасного автомобільного транспорту передбачає збільшення потужності його двигунів при зниженні витрат палива і викидів в атмосферу продуктів згорання. Для досягнення поставлених цілей двигуни внутрішнього згорання оснащуються турбокомпресорами, охолоджувачами наддувочного повітря, акумуляторними системами подачі палива та електронними елементами управління.

Наразі в більшості випадків несправності системи наддуву двигунів внутрішнього згорання виявляються за зовнішніми ознаками. Підвищити якість процесу діагностування систем наддуву двигунів можна, в тому числі, і створенням нових математичних моделей їх функціонування.

Проаналізовано сучасні методи і засоби діагностування турбокомпресорів, як складового елемента системи наддуву двигунів автомобільного транспорту. Встановлено, що наявні методи і засоби діагностування турбокомпресорів не в повній мірі дозволяють визначати їх поточний технічний стан, що вимагає розробки математичних моделей їх вузлів та деталей як об'єкта діагностування.

Як об'єкт діагностування обрано турбокомпресор ЯМЗ-650.1118011, який входить до складу системи наддуву дизельних двигунів ЯМЗ-650.10, ЯМЗ-6501.10 та ЯМЗ-6502.10.

Представлено аналіз особливостей конструкції турбокомпресора ЯМЗ-650.1118011, як об'єкта діагностування.

Заміна реальних технічних пристроїв їх ідеалізованими моделями дозволяє широко застосовувати різні математичні методи. Запропоновано в загальному вигляді математичну модель, яка представляє собою систему функціональних залежностей між кожним діагностичним сигналом і структурними параметрами.

Для турбокомпресора ЯМЗ-650.1118011 складена матриця діагностування, яка включає перелік несправностей та ознак несправностей.

За допомогою розробленої математичної моделі можна ефективно проводити діагностування турбокомпресора ЯМЗ-650.1118011. При розробці математичної моделі враховано, що зворотне перетворення кількості ознак несправностей у кількість структурних параметрів (несправностей) об'єкта було однозначним.

Дослідження запропонованої математичної моделі діагностування турбокомпресора ЯМЗ-650.1118011 дозволить виявити несправності його вузлів та деталей в залежності від їх ознак, що значно підвищить термін безвідмовної роботи як самого турбокомпресора, так і двигуна транспортного засобу.

Ключові слова: математична модель, діагностування, двигун внутрішнього згорання, турбокомпресор, матриця діагностування, блок-схема, несправність, ознака несправності, булева функція.

Вступ

Значне зростання кількості транспортних засобів, збільшення марок і моделей, найчастіше іноземного виробництва, ускладнення їх конструкцій і адаптація вимог нормативної документації по технічному стану транспортних засобів до світових стандартів вимагають розробки сучасних методів та засобів діагностування їх вузлів і агрегатів [1].

Тенденція сучасного автомобілебудування спрямована на постійне підвищення ефективності експлуатації автомобільного транспорту, зокрема – підвищення характеристик потужності двигунів при зниженні витрати палива і викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами [2, 3]. Одним з конструктивних рішень, що дозволяють досягти значних поліпшень за цими параметрами, є використання турбокомпресорів.

Постановка проблеми

Система турбонаддуву автотракторних дизелів в класичному її конструктивному виконанні складається з двигуна, турбіни і компресора. Між турбіною і компресором має місце механічний зв'язок, а між турбіною і двигуном – газовий. При відносно простій конструктивній схемі і нескладному принципу дії турбокомпресора, визначення його технічного стану в процесі експлуатації є непростим завданням. Несправності в будь-якому з елементів, що поступово розвиваються в процесі експлуатації і зовні не помітні, виявляються на певних режимах роботи і можуть привести до відмови турбокомпресора, або двигуна в цілому.

Складність діагностування турбокомпресора визначається багатьма причинами. По-перше, показники ефективності функціонування турбокомпресора в експлуатації залежать як від технічних і режимних характеристик двигуна, так і самого турбокомпресора. По-друге, на сьогодні практично відсутні надійні інструментальні засоби контролю технічного стану турбокомпресора в експлуатації. Визначення найбільш інформативних функціональних параметрів турбокомпресора, встановлення їх граничних значень, розробка методів і засобів їх контролю є першорядним при технічному сервісі двигунів внутрішнього згорання.

Незважаючи на те, що проблемам надійності турбокомпресорів та умовам їх роботи присвячено значну кількість робіт [4 – 10], складність конструкції, невисока якість виготовлення і застосовуваних експлуатаційних матеріалів, неправильна експлуатація призводять до їхніх передчасних відмов, що значно погіршує техніко-експлуатаційні якості двигуна – значно знижується потужність і збільшуються витрати палива і викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами.

Статистика виходу з ладу окремих вузлів і агрегатів автотракторних двигунів внутрішнього згорання показує, що 45% від всіх відмов становлять відмови системи живлення паливом і повітрям [10]. Отже, дослідження, спрямовані на вдосконалення методів і засобів діагностування систем подачі повітря автотракторних двигунів з турбонаддувом при технічному сервісі є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Огляд теоретичних і експериментальних досліджень в області експлуатації та визначення технічного стану автотракторних двигунів [11 – 19] показав, що на сьогодні створені певні науково-методичні і технічні основи технічного сервісу повітроподавальних систем автотракторних двигунів. Разом з тим, наявні технології і методи діагностування, контролю і оцінки технічного стану окремих елементів сучасних систем турбонаддуву не враховують повною мірою особливостей їх функціонування.

В роботі [20] представлено математичну модель ефективності використання засобів діагностування турбокомпресорів автотракторних двигунів в процесі планування технічного обслуговування і ремонту.

В роботах [21 – 26] проведено огляд наявних методів і засобів діагностування турбокомпресорів автотракторних двигунів, аналіз яких виявив основні недоліки в розрахунках і проектуванні діагностичного обладнання.

Проблема вдосконалення методів і засобів діагностування автотракторних двигунів представлена в роботах [27 – 31], під час аналізу яких встановлено, що більшість методів діагностування турбокомпресорів не достатньо враховують повною мірою особливостей їх функціонування, відрізняються високою вартістю і складністю застосовуваного обладнання.

В ході аналізу останніх досліджень і публікацій з представленої теми встановлено, що конкретних математичних залежностей визначення технічного стану системи турбонаддуву двигуна не виявлено.

Мета дослідження

Надійність транспортного засобу залежить від надійності його вузлів та агрегатів, і одним з таких агрегатів є турбокомпресор двигуна внутрішнього згорання.

Підвищення достовірності і зниження трудомісткості діагностичних робіт при технічному сервісі двигунів з турбонаддувом може бути досягнуто удосконаленням засобів діагностування, що володіють можливістю оцифрування отриманих прямим вимірванням даних і подальшою обробкою їх з використанням математичного апарату.

Метою дослідження є підвищення надійності турбокомпресора двигуна внутрішнього згорання, за рахунок дослідження його робочих параметрів на основі розробленої математичної моделі діагностування його вузлів та деталей, в якій враховуються як несправності, так і ознаки несправностей.

Аналіз конструкції турбокомпресора ЯМЗ-650.1118011

Турбокомпресор – це повітряний насос, який приводиться в дію від турбіни, яка обертається за рахунок потоку відпрацьованих газів [14]. Частота обертання турбокомпресора дизельного двигуна від 1000 до 130000 об/хв.

Турбіна з'єднується з компресором жорсткою віссю. Компресор через повітряний фільтр засмоктує свіже повітря, потім стискає його і під тиском подає у впускний колектор двигуна. Велика кількість повітря, що подається в циліндр допомагає спалити більшу кількість палива, що підвищує потужність двигуна.

В теорії існує рівновага потужностей між турбіною і компресором турбокомпресора. Чим більше енергія відпрацьованих газів, тим швидше буде обертатися турбіна. А значить, компресор теж буде обертатися швидше.

Для забезпечення необхідних показників потужності, двигуни ЯМЗ-650.10, ЯМЗ-6501.10 та ЯМЗ-6502.10 обладнані турбокомпресором ЯМЗ-650.1118011 (рис. 1), який використовує енергію відпрацьованих газів для наддуву двигуна [32 – 34].

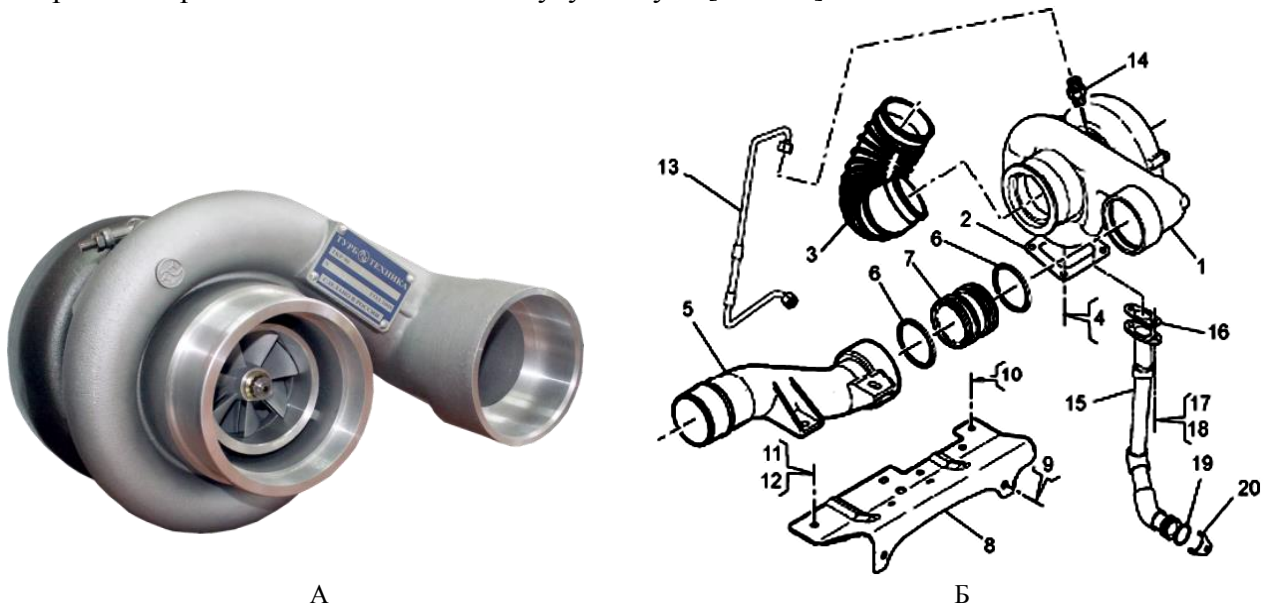


Рис. 1. Турбокомпресор ЯМЗ-650.1118011 [34]:

а – загальний вигляд; б – складові частини;

- 1 – турбокомпресор; 2 – прокладка турбокомпресора; 3 – патрубок впускний; 4, 9, 10, 11 – болт;
 5 – патрубок підведення повітря до охолоджувача наддувочного повітря; 6, 19 – кільце; 7 – з'єднувальна втулка;
 8 – теплозахисний передній екран; 12 – гайка; 13 – трубка підведення масла до турбокомпресора; 14 – штуцер;
 15 – патрубок зливу масла з турбокомпресора; 16 – прокладка патрубка зливу масла; 17 – гвинт; 18 – шайба;
 20 – стопорна пластина

Турбокомпресор ЯМЗ-650.1118011 містить радіальну доцентрову турбину і відцентровий компресор, обладнаний перепускним клапаном.

Викладення основного матеріалу

Кожен двигун з наддувом характеризується певним шумовим рівнем. Тому багато несправностей можуть бути виявлені при зміні звичайного шуму. Якщо шум стає більш різким, причиною несправності може бути витік повітря (між турбокомпресором і впускним колектором) або вихлопних газів, а також дефект валу, що обертається. Переривчастий шум може пояснюватися засміченням турбокомпресора або використанням занадто низького режиму роботи двигуна по відношенню до навантаження. Поява вібрацій може вказувати на пошкодження обертового вала. Різке зниження шумового рівня, що супроводжується появою чорного або сивого диму на вихлопі, свідчить про повний вихід турбокомпресора з ладу. У всіх подібних випадках слід негайно зупинити двигун, щоб запобігти ще більш серйозному пошкодженню двигуна або турбокомпресора.

За рахунок автоматизації логічного процесу постановки діагнозу можна попередити вищевказані несправності турбокомпресора.

Вирішення задачі автоматизації логічного процесу постановки діагнозу вимагає розробки моделей елементів турбокомпресора як об'єктів діагностування, що описують на одному математичному рівні взаємозв'язки між безліччю можливих несправностей і безліччю значень діагностичних параметрів.

Заміна об'єкта діагностування моделлю пов'язана з виділенням основних, істотних для постановки діагнозу елементів і властивостей, пов'язаних із завданням визначення дійсного технічного стану об'єктів. При цьому деяка кількість елементів і зав'язків об'єкта, виключно важливих з точки зору його функціонування як пристрою, призначеного для виконання певної роботи, стають другорядними і при розробці моделі технічного пристрою, як об'єкта діагностування, можуть бути виключені.

Заміна реальних технічних пристроїв їх ідеалізованими моделями дозволяє широко використовувати різні математичні методи. Під математичною моделлю об'єкта діагностування розуміють безліч аналітичних, логічних, статистичних, графічних і взагалі будь-яких якісних співвідношень, які пов'язують вихідні параметри об'єкта з його вхідними і внутрішніми параметрами.

Найбільш універсальною моделлю об'єкта діагностування є представлення його у вигляді «чорного ящика», вхідні і вихідні параметри якого мають кінцеву множину значень. Передбачається, що всі можливі стани об'єкта утворюють кінцеву множину станів. В цьому випадку об'єкт є «чорним ящиком» не тому, що його внутрішня структура і параметри повністю не відомі, а тому, що накладається заборона на доступ до них і стан об'єкта можна визначати, тільки досліджуючи його вихідні параметри (без розбирання) [35 – 38].

Для представлення об'єкта діагностування у вигляді «чорного ящика» необхідно задати (рис. 2):

- кількість всіх вхідних дій Y від стимулюючих пристроїв і зовнішнього середовища;
- кількість всіх вихідних ознак несправності S ;
- кількість всіх несправностей об'єкта діагностування X ;
- оператор A , який перетворює кількості X та Y в кількість S :

$$S = A\{Y, X\}. \quad (1)$$

Враховуючи, що при діагностуванні елементи кількості Y стабілізуються (або змінюються по заданому закону), вираз (1) перетвориться у вид:

$$S = A\{X\}. \quad (2)$$

Іншими словами, будь-який вихідний параметр об'єкта діагностування є функцією його технічного стану при цьому стані входів.

Якщо несправність об'єкта діагностування $\{X_i\}$ віднести до вихідних параметрів автоматизованої системи, то діагностична задача формулюється наступним чином: по відомим ознакам несправності $\{S_j\}$ визначити невідомі несправності об'єкта діагностування $\{X_i\}$.

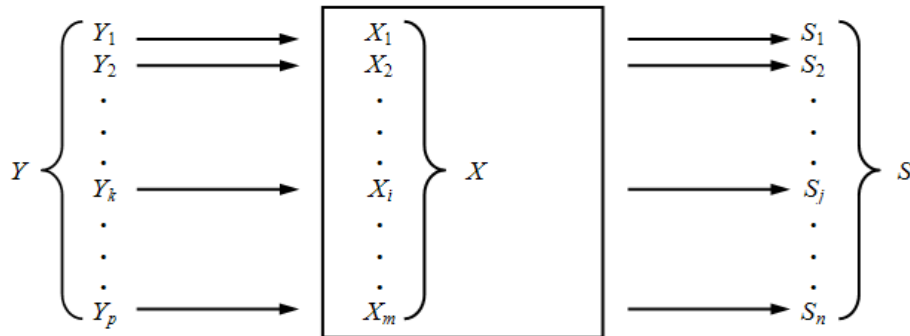


Рис. 2. Представлення об'єкта діагностування у вигляді «чорного ящика»

Для успішного вирішення цього завдання необхідно знати вид оператора A , іншими словами, необхідний вичерпний опис зв'язків між усіма вихідними параметрами і всіма можливими станами (несправностями) об'єкта.

Нижче описується ряд моделей об'єктів діагностування, що відрізняються один від одного різними формами опису зазначених зв'язків.

При наявності аналітичної моделі об'єкта діагностування завдання постановки діагнозу в загальному вигляді формулюється таким чином. За даними ознаками несправності S_1, S_2, \dots, S_n , отриманих в результаті відповідних вимірювань, визначити технічний стан (несправності) об'єкта діагностування X_1, X_2, \dots, X_m , якщо відомі функціональні залежності між кожним діагностичним сигналом і структурними параметрами:

$$\begin{cases} S_1 = \varphi_1(x_1, x_2, \dots, x_m); \\ S_2 = \varphi_2(x_1, x_2, \dots, x_m); \\ \dots \\ S_j = \varphi_j(x_1, x_2, \dots, x_m); \\ \dots \\ S_n = \varphi_n(x_1, x_2, \dots, x_m). \end{cases} \quad (3)$$

Система рівнянь (3) є математичною моделлю об'єкта діагностування, що має m структурних параметрів і n діагностичних сигналів.

Очевидною перевагою постановки діагнозу з використанням аналітичної моделі є можливість отримання конкретної несправності об'єкта діагностування, що дозволяє визначити технічний стан об'єкта не тільки в момент діагностування, але і, накопичуючи інформацію, отриману за кілька діагностичних обстежень об'єкта, аналізувати зміну структурних параметрів з метою прогнозування його технічного стану.

Однак практичне використання такої аналітичної моделі поки обмежено в силу таких обставин:

- вид функцій φ_j для більшості вузлів і механізмів поки не встановлений;
- якщо функція φ_j не задовольняє умовам безперервності і диференціювання по кожному з своїх аргументів, що зазвичай має місце в реальних моделях, то рішення системи рівнянь (3) пов'язано з великими математичними труднощами;

– більшість діагностичних параметрів, в принципі не можуть бути виражені у вигляді аналітичних функцій структурних параметрів.

У ряді робіт з технічного діагностування машин і механізмів, можливі технічні стани (несправності) агрегатів і систем та ознаками цих несправностей описуються у вигляді так званих діагностичних матриць [39 – 45].

З досвіду багаторічної експлуатації двигунів ЯМЗ-650.10, ЯМЗ-6501.10 та ЯМЗ-6502.10 в таблиці 1 представлена матриця діагностування турбокомпресора ЯМЗ-650.1118011, яким вони оснащуються [32, 33].

Таблиця 1

Матриця діагностування турбокомпресора ЯМЗ-650.1118011

Несправність турбокомпресора ЯМЗ-650.1118011	Ознака несправності турбокомпресора ЯМЗ-650.1118011							
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
x_1	+	+	-	+	+	+	+	-
x_2	+	-	-	-	-	-	-	-
x_3	+	+	+	+	+	+	+	-
x_4	-	+	-	+	-	-	-	-
x_5	+	-	-	+	-	-	-	-
x_6	+	+	-	-	-	-	-	-
x_7	+	+	-	+	-	-	-	-
x_8	+	+	+	+	+	-	+	+
x_9	+	+	+	+	+	-	+	-
x_{10}	+	+	+	+	-	-	-	-
x_{11}	-	-	+	-	+	-	+	+
x_{12}	-	-	+	-	-	-	-	-
x_{13}	-	-	+	-	+	+	-	-
x_{14}	-	-	-	+	+	+	+	-
x_{15}	-	+	-	-	-	-	-	-
x_{16}	-	-	-	+	+	-	-	-
x_{17}	-	-	-	-	+	-	+	+

В матриці діагностування позначимо наступні несправності турбокомпресора ЯМЗ-650.1118011:

- x_1 – засмічення повітряного фільтру;
- x_2 – несправний охолоджувач наддувочного повітря (засмічення трубок);
- x_3 – засмічені або перетиснуті впускні повітряні патрубки (між повітряним фільтром і турбокомпресором);
- x_4 – засмічені або перетиснуті впускні патрубки наддувочного повітря (між турбокомпресором і двигуном);
- x_5 – потрапляння сторонніх предметів між повітряним фільтром і турбокомпресором;
- x_6 – засмічення в системі випуску газів;
- x_7 – витік повітря або вихлопних газів між турбокомпресором і двигуном;
- x_8 – пошкоджений або засмічений картер турбіни;
- x_9 – пошкоджені лопатки коліс турбокомпресора;
- x_{10} – неправильна робота системи регулювання тиску турбокомпресора;
- x_{11} – засмічення сапуна двигуна;
- x_{12} – витрата масла;
- x_{13} – несправний пневмокомпресор;
- x_{14} – недостатня герметичність з'єднання між повітряним фільтром і турбокомпресором;
- x_{15} – засмічена або перетиснута система випуску;

x_{16} – недостатнє змащування турбокомпресора;
 x_{17} – засмічений або перетиснений відвідний маслопровід.

Також в матриці діагностування вводимо ознаки вище зазначених несправностей турбокомпресора ЯМЗ-650.1118011:

- S_1 – зменшена потужність двигуна;
- S_2 – вихлопні гази чорного кольору;
- S_3 – вихлопні гази сивого кольору;
- S_4 – шум в турбокомпресорі;
- S_5 – надмірна витрата масла;
- S_6 – наявність масла в повітрязабірних патрубках турбокомпресора;
- S_7 – наявність масла в повітряних патрубках після турбокомпресора;
- S_8 – наявність масла в вихлопних магістралях після турбокомпресора.

Як видно з таблиці 1, кожна несправність характеризується певною комбінацією значень її ознак, які можуть приймати два умовних значення: «-» або «+».

На перетині i -го рядка і j -го стовпця ставиться «+», якщо при наявності i -ї несправності спостерігається вихід j -ї ознаки з області її допустимих значень, в протилежному випадку ставиться «-».

Для синтезу такої матриці необхідно нескінченну кількість технічних станів об'єкта замінити кінцевою множиною технічних станів, кожний з яких пов'язано з певною несправністю (або їх комбінацією) або з працездатним станом (рис. 3).

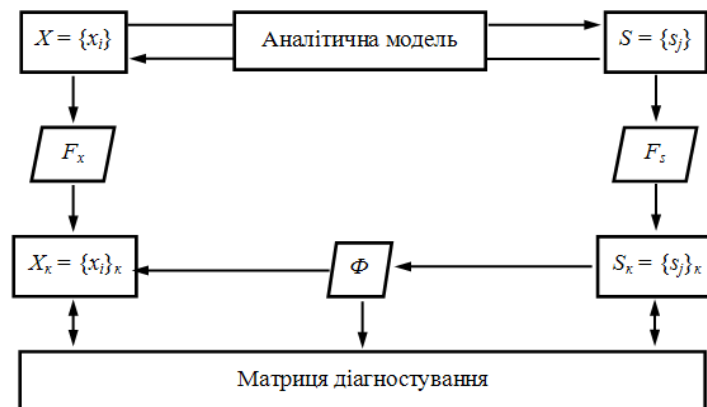


Рис. 3. Блок-схема синтезу матриці діагностування турбокомпресора ЯМЗ-650.1118011:

$X = \{x_i\}$ – нескінченна кількість технічних станів об'єкта;

$X_k = \{x_{i_k}\}$ – кінцева кількість технічних станів;

$S = \{s_j\}$ – нескінченна множина ознак технічних станів об'єкта;

$S_k = \{s_{j_k}\}$ – кінцева множина ознак технічних станів об'єкта

F_x – оператор, перетворюючий кількість $\{x_i\}$ в кількість $\{x_{i_k}\}$;

F_s – оператор, що перетворює кількість $\{s_j\}$ в кількість $\{s_{j_k}\}$;

Φ – оператор, що перетворює кількість технічних станів об'єкта в кількість діагностичних параметрів.

Таке перетворення може бути записано у вигляді

$$\{x_{i_k}\} = F_x \{x_i\}, \tag{4}$$

де $\{x_i\}$ – множина ознак технічних станів об'єкта діагностування, кожна з яких може приймати в загальному випадку нескінченну кількість значень; $\{x_{i_k}\}$ – кінцева множина ознак технічних станів об'єкта діагностування, кожна з яких може приймати лише два умовних значення «-» і «+», які відповідають відсутності та наявності i -ї несправності; $i = 1, 2, \dots, m$; F_x – оператор, який перетворює кількість $\{x_i\}$ в кількість $\{x_{i_k}\}$ наступним чином: для будь-якого

i -го параметру x_i присвоюється значення «-», якщо величина лежить в області допустимих значень, в протилежному випадку присвоюється значення «+».

Перетворення нескінченної кількості значень параметрів вихідних процесів в кінцеву кількість значень діагностичних параметрів може бути записано у вигляді

$$\{s_j\}_k = F_s \{s_j\}, \quad (5)$$

де $\{s_j\}$ – кількість ознак вихідних процесів, кожна з яких може приймати в загальному випадку нескінченну кількість значень в певному інтервалі; $\{s_j\}_k$ – кінцева кількість діагностичних ознак, кожна з яких може приймати тільки два умовних значення: «-» або «+»; $j = 1, 2, \dots, n$; F_s – оператор, що перетворює кількість $\{s_j\}$ в кількість $\{s_j\}_k$ наступним чином: будь-якій j -ій ознаці s_j присвоюється умовне значення «-», якщо величина лежить в області значень, що відповідають справному стану об'єкта діагностування, в протилежному випадку присвоюється значення «+».

В результаті проведених перетворень отримано два кінцевих значення $\{x_i\}_k$ і $\{s_j\}_k$, елементи яких певним чином пов'язані один з одним.

У загальному вигляді цей зв'язок може бути виражений у вигляді

$$\{s_j\}_k = \Phi\{x_i\}_k, \quad (6)$$

де Φ – оператор, що перетворює кількість технічних станів об'єкта в кількість діагностичних параметрів.

Перетворення (6) відображає функціонування будь-якого технічного об'єкта як перетворювача кількості структурних параметрів у кількість діагностичних параметрів і є модифікацією моделі (1).

Перетворення (6) можна розгорнути за допомогою системи (3).

Система рівнянь (3) пов'язує кожну ознаку несправності S_j з усіма структурними параметрами об'єкта діагностування, що відображає зв'язки між структурними параметрами і діагностичними сигналами.

Матриця діагностування, як модель об'єкта діагностування, показує, що вона є по суті справи табличною формою запису системи рівнянь (1).

Параметр S_1 в матриці діагностування можна розглядати як двозначну булеву функцію, яка залежить від аргумента x_1 . Булева функція залежить від аргумента x_1 , якщо має місце співвідношення:

$$\varphi(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_m) \neq \varphi(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_m)$$

Як впливає з цього визначення та таблиці 1, S_1 істотно залежить лише від $x_1, x_2, x_3, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9$ та x_{10} .

Залежність $S_1 = \varphi_1(x_1, x_2, x_3, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10})$ виражається в цьому випадку у вигляді функції логічного додавання (диз'юнкція):

$$S_1 = x_1 + x_2 + x_3 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10}.$$

Відповідний аналіз інших ознак несправностей дозволяє записати систему рівнянь (3) для цієї матриці діагностування турбокомпресора ЯМЗ-650.1118011 у вигляді:

$$\begin{cases} S_1 = x_1 + x_2 + x_3 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10}; \\ S_2 = x_1 + x_3 + x_4 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{15}; \\ S_3 = x_3 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13}; \\ S_4 = x_1 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{14} + x_{16}; \\ S_5 = x_1 + x_3 + x_8 + x_9 + x_{11} + x_{13} + x_{14} + x_{16} + x_{17}; \\ S_6 = x_1 + x_3 + x_{13} + x_{14}; \\ S_7 = x_1 + x_3 + x_8 + x_9 + x_{11} + x_{14} + x_{17}; \\ S_8 = x_8 + x_{11} + x_{17}. \end{cases} \quad (7)$$

Всі послідовні перетворення, що приводять до синтезу моделі об'єкта діагностування у вигляді діагностичної матриці, наочно представлені на блок-схемі (рис. 3). У тому випадку, коли модель об'єкта діагностування представлена у вигляді діагностичної матриці, діагностична задача формулюється таким чином.

За ознаками несправностей S_1, S_2, \dots, S_n отриманими при діагностичному обстеженні, потрібно визначити несправності x_1, x_2, \dots, x_m в момент перевірки, якщо відомі функціональні залежності між діагностичними параметрами і всіма структурними параметрами, що задані у вигляді діагностичної матриці або системи рівнянь типу (7). Кожен структурний параметр і кожен діагностичний параметр приймає тільки два значення: «-» або «+».

Очевидно що для вирішення діагностичної задачі необхідне зворотне перетворення кількості діагностичних параметрів в кількість структурних параметрів, тому що при постановці діагнозу відомими є саме значення діагностичних параметрів.

У загальному вигляді зворотне перетворення можна представити виразом

$$\{x_i\}_k = \Phi^{-1}\{s_j\}_k,$$

або в розгорнутому вигляді

$$\begin{cases} x_1 = f_1(S_1, S_2, \dots, S_n); \\ x_2 = f_2(S_1, S_2, \dots, S_n); \\ x_m = f_m(S_1, S_2, \dots, S_n). \end{cases} \quad (8)$$

Вид функцій f_m неважко встановити в кожному конкретному випадку на основі наступних міркувань.

У діагностичній матриці розглянемо окремо один із стовбців, наприклад, перший. З матриці видно, що наявність несправності x_1 викликає одночасно вихід ознак S_1, S_2, S_4, S_5, S_6 та S_7 з області їх допустимих значень. Значення інших діагностичних параметрів при наявності тільки несправності x_1 залишаються в межах норми. Значить x_1 є булевою функцією, в цьому випадку кон'юнкція (або функцією логічного множення):

$$x_1 = S_1 \cdot S_2 \cdot S_4 \cdot S_5 \cdot S_6 \cdot S_7.$$

Відповідний аналіз всіх інших стовбців розглянутої матриці дозволяє зворотне перетворення (3) записати в вигляді системи булевих функцій (кон'юнкцій):

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = S_1 \cdot S_2 \cdot S_4 \cdot S_5 \cdot S_6 \cdot S_7; \\ x_2 = S_1; \\ x_3 = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot S_4 \cdot S_5 \cdot S_6 \cdot S_7; \\ x_4 = S_2 \cdot S_4; \\ x_5 = S_1 \cdot S_4; \\ x_6 = S_1 \cdot S_2; \\ x_7 = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3; \\ x_8 = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot S_4 \cdot S_5 \cdot S_7 \cdot S_8; \\ x_9 = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot S_4 \cdot S_5 \cdot S_7; \\ x_{10} = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot S_4; \\ x_{11} = S_3 \cdot S_5 \cdot S_7 \cdot S_8; \\ x_{12} = S_3; \\ x_{13} = S_3 \cdot S_5 \cdot S_6; \\ x_{14} = S_4 \cdot S_5 \cdot S_6 \cdot S_7; \\ x_{15} = S_2; \\ x_{16} = S_4 \cdot S_5; \\ x_{17} = S_5 \cdot S_7 \cdot S_8. \end{array} \right. \quad (9)$$

Як видно з цього прикладу, процес постановки діагнозу на основі моделі об'єкта діагностування, вираженої у вигляді діагностичної матриці, складається з таких етапів:

- шляхом відповідних вимірювань і перетворень (5) встановлюються ознаки всіх несправностей S_1, S_2, \dots, S_n ;
- значення діагностичних параметрів підставляються в систему булевих функцій (8);
- обчислюються значення всіх булевих функцій несправностей x_i ($i = 1, 2, \dots, m$) причому якщо $x_i = 1$, то в об'єкті є i -та несправність.

Виходячи з того, що об'єкт діагностування є працездатним лише у випадку відсутності всіх несправностей, то функція його робоздатності набуде вигляду:

$$F_p = \overline{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{17}}. \quad (10)$$

Повертаючись до блок-схеми синтезу матриці діагностування (рис. 3), можна сформулювати в загальному вигляді умову здійснення діагностування наступним чином: для здійснення діагностування достатньо, щоб зворотне перетворення кількості ознак несправностей у кількість структурних параметрів (несправностей) об'єкта було однозначним.

Якщо при синтезі діагностичної матриці не виконана ця умова і в системі (8) є дві або більше рівних функцій, то перелік діагностичних параметрів необхідно доповнити новим параметром, який увійшов би в якості додаткового аргументу тільки в одну з розглянутих рівних функцій.

Висновки

1. В ході аналізу останніх досліджень і публікацій з представленої теми встановлено, що конкретних математичних залежностей визначення технічного стану системи турбонаддуву двигуна не виявлено.

2. Представлено аналіз особливостей конструкції турбокомпресора ЯМЗ-650.1118011, як об'єкта діагностування.

3. Турбокомпресор ЯМЗ-650.1118011, як об'єкт діагностування, представлено у вигляді «чорного ящика», вхідні і вихідні параметри якого мають кінцеву множину значень.

4. Для турбокомпресора ЯМЗ-650.1118011 складена матриця діагностування, яка включає перелік несправностей та ознак несправностей. Матриця діагностування, як модель об'єкта діагностування, показує, що вона є табличною формою запису математичної моделі об'єкта діагностування.

5. За допомогою розробленої математичної моделі можна ефективно проводити діагностування турбокомпресора ЯМЗ-650.1118011. При розробці математичної моделі враховано, що зворотне перетворення кількості ознак несправностей у кількість структурних параметрів (несправностей) об'єкта було однозначним.

6. Дослідження запропонованої математичної моделі діагностування турбокомпресора ЯМЗ-650.1118011 дозволить виявити несправності його вузлів та деталей в залежності від їх ознак, що значно підвищить термін безвідмовної роботи як самого турбокомпресора, так двигунів ЯМЗ-650.10, ЯМЗ-6501.10 та ЯМЗ-6502.10.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Савич Е. Л. Инструментальный контроль автотранспортных средств / Е. Л. Савич, А. С. Кручек. – Мн. : Новое знание, 2008. – 399 с.
2. Lázaro L. Strategies for emission control in diesel engine to meet Euro VI / L. Lázaro, F. Squaiella, C. Aparecida Martins, T. Pedro // Fuel. – 2013. – Vol. 104. – P. 183 – 193.
3. Trends of NO-, NO₂-, and NH₃-emissions from gasoline-fueled Euro-3- to Euro-4-passenger cars / N. V. Heeb, C. J. Saxer, A.-M. Forss [et al.] // Atmospheric environment. – 2008. – Vol. 42, Iss. 10. – P. 2543 – 2554.
4. Gadyaka V. Phenomena of stability loss of rotor rotation at tilting pad bearings / V. Gadyaka, D. Leikykh, V. Simonovskiy // Procedia engineering. – 2012. – Vol. 39. – P. 244 – 253.
5. Serrano J. R. Theoretical and experimental study of mechanical losses in automotive turbochargers / J. R. Serrano, P. Olmeda, A. Tiseira [et al.] // Energy. – 2013. – Vol. 55. – P. 888 – 898.
6. Forsthoffer B. Turbocompressor performance condition monitoring / B. Forsthoffer, I. F. Santos // Forsthoffer's rotating equipment handbooks. – 2005. – Vol. 3. – P. 279 – 287.
7. Harnoy A. Bearing design in machinery: engineering tribology and lubrication / A. Harnoy. – New York: Marcel Dekker, 2003. – 440 p.
8. On the influence of lubricant on dynamics of two-dimensional journal bearings / X. K. Li, D. Rh. Gwynllyw, A. R. Davies [et al.] // J. Non-Newtonian Fluid Mech. – 2000. – Vol. 93. – P. 29 – 59.
9. Lund J. W. An aproximate analysis of temperature conditions in a Journal Bearings. Part I: Teory / J. W. Lund, P. K. Hansen // Journal of Tribology. – 1984. – Vol. 106, Iss. 2. – P. 228 – 236.
10. Кувшинов А. Н. Повышение эффективности диагностирования систем газотурбинного наддува двигателей мобильной сельскохозяйственной техники : автореф. дисс. ... канд. техн. наук: спец. 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» / А. Н. Кувшинов. – Саранск, 2013. – 17 с.
11. Ждановский Н. С. Диагностика дизелей автотракторного типа / Н. С. Ждановский, Б. А. Улитовский, В. А. Аллилуев. – М. : Колос, 1970. – 191 с.
12. Михлин В. М. Прогнозирование технического состояния машин / В. М. Михлин. – М. : Колос, 1976. – 287 с.
13. Скибневский К. Ю. Средства и методы диагностирования тракторов / К. Ю. Скибневский. – М. : Колос, 1978. – 80 с.
14. Азбель А. Б. Турбонаддув высокооборотных дизелей / А. Б. Азбель, Г. М. Поветкин, Ю. Б. Моргулис. – М. : Машиностроение, 1976. – 288 с.
15. Биргер И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1978. – 240 с.
16. Савельев А. П. Диагностирование тракторов по динамическому состоянию машинно-тракторных агрегатов / А. П. Савельев. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 1993. – 220 с.
17. Топливные системы современных и перспективных двигателей внутреннего сгорания / [В. В. Салмин, В. В. Ланденбургский, А. М. Белоковильский, П. И. Аношкин и др.]. – Пенза : ПГУАС, 2006. – 252 с.
18. Терских И. П. Функциональная диагностика машинно-тракторных агрегатов / И. П. Терских. – Иркутск : Изд-во Иркутского университета, 1987. – 312 с.

19. Бельских В. И. Справочник по техническому обслуживанию и диагностированию тракторов / В. И. Бельских. – М. : Россельхозиздат, 1986. – 399 с.
20. Алексеев О. А. Обоснование средств диагностирования турбокомпрессоров мобильных энергетических средств : автореф. дисс. ... канд. техн. наук: спец. 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» / О. А. Алексеев. – Оренбург, 2007. – 21 с.
21. Иншаков А. П. Автоматизированный комплекс для диагностирования систем наддува воздуха в двигателях МЭС / А. П. Иншаков, А. Н. Кувшинов, И. И. Курбаков // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 10. – С. 16 – 18.
22. Иншаков А. П. Измерительные модули для диагностики турбокомпрессоров / А. П. Иншаков, А. Н. Кувшинов, С. С. Родионов // Сельский механизатор. – 2011. – № 8. – С. 40 – 41.
23. Иншаков А. П. Контроль давления наддува при диагностировании турбокомпрессоров тракторных дизелей / А. П. Иншаков, А. Н. Кувшинов // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – № 1. – С. 24 – 25.
24. Иншаков А. П. Необходимость комплексного подхода к диагностированию систем наддува тракторных дизелей / А. П. Иншаков, А. Н. Кувшинов, О. Ф. Корнаухов // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 10. – С. 15 – 16.
25. Патрахальцев Н. Н. Форсирование двигателей внутреннего сгорания наддувом / Н. Н. Патрахальцев, А. А. Севастенко. – М. : Легион-Автодата, 2007. – 176 с.
26. Крутов В. И. Регулирование турбонаддува ДВС / В. И. Крутов, А. Н. Рыбальченко. – М. : Высшая школа, 1978. – 213 с.
27. Автоматизированные технологические комплексы экспертизы двигателей / [О. Ф. Савченко, И. П. Добролюбов, В. В. Альт, С. Н. Ольшевский]. – Новосибирск : РАСХН. Сиб. отд-ние. – СибФТИ. – 2006. – 272 с.
28. Повышение готовности к использованию по назначению мобильной техники совершенствованием системы диагностирования / [Бышов Н. В., Борычев С. Н., Успенский И. А., Кокорев Г. Д. и др.]. – Рязань : Издательство «ФГБОУ ВПО РГАТУ», 2013. – 187 с.
29. Добролюбов И. П. Обоснование признаков классификации при экспресс-экспертизе состояния ДВС с помощью измерительного технологического комплекса / И. П. Добролюбов // Двигателестроение. – 1999. – № 2. – С. 25 – 29.
30. Кокорев Г. Д. Методология совершенствования системы технической эксплуатации мобильной техники в сельском хозяйстве / Г. Д. Кокорев. – Рязань : Издательство «ФГБОУ ВПО РГАТУ», 2013. – 239 с.
31. Лянденбургский В. В. Программа поиска неисправностей дизельных двигателей / В. В. Лянденбургский, А. И. Тарасов, С. А. Кривобок // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 8. – С. 17 – 20.
32. Двигатель ЯМЗ-650. Руководство по ремонту. – Ярославль : ООО «Силовые агрегаты – Группа ГАЗ», 2009. – 132 с.
33. Силовые агрегаты ЯМЗ-650, ЯМЗ-6501, ЯМЗ-6502. – Ярославль : ПАО «Автодизель», 2018. – 115 с.
34. Дизельный двигатель ЯМЗ-650.10, его модификации и комплектации. Каталог деталей и сборочных единиц. – Ярославль : ООО «Силовые агрегаты - Группа ГАЗ», 2011. – 78 с.
35. Ананьин А. Д. Диагностика и техническое обслуживание машин / А. Д. Ананьин, В. М. Михлин, И. И. Габитов. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 432 с.
36. Сырбаков А. П. Диагностика и техническое обслуживание / А. П. Сырбаков, М. А. Корчуганова. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 220 с.
37. Яхьяев Н. Я. Основы теории надежности и диагностика / Н. Я. Яхьяев, А. В. Кораблин. – М. : Издательский центр «Академия», 2009. – 256 с.
38. Бельских В. И. Диагностика технического состояния и регулировка тракторов / В. И. Бельских. – М. : «Колос», 1973. – 496 с.
39. Мирошников Л. В. Диагностирование технического состояния автомобилей на автотранспортных предприятиях / Л. В. Мирошников, А. П. Болдин, В. И. Пал. – М. : Транспорт, 1977. – 264 с.
40. Малкин В. С. Техническая диагностика / В. С. Малкин. – СПб. : Издательство «Лань», 2013. – 267 с.
41. Mathematical model of a wheeled tractor steering axle as an object of diagnostics / D. Borysiuk, A. Spirin, O. Trukhanska [et al.] // ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2017. – Vol. 17, № 1. – P. 41 – 47.
42. Математична модель діагностування системи уприскування палива «Mono-Jetronic» / В. М. Барановський, А. В. Спірін, В. Й. Зелінський [та ін.] // Вісник машинобудування та транспорту. – 2018. – Вип. 1 (7). – С. 10 – 17.
43. Борисюк Д. В. Математична модель ударно-спускового механізму автомата Калашникова як об'єкта діагностування / Д. В. Борисюк, В. В. Білченко, В. Й. Зелінський // Вісник машинобудування та транспорту. – 2018. – Вип. 2 (8). – С. 4 – 14.

44. Борисюк Д. В. Математична модель ударно-спускового механізму пістолета Макарова як об'єкта діагностування / Д. В. Борисюк, В. В. Біліченко, В. Й. Зелінський // Вісник машинобудування та транспорту. – 2019. – Вип. 1 (9). – С. 15 – 26.

45. Борисюк Д. В. Вибір та обґрунтування параметрів вібродіагностування керованих мостів колісних тракторів : автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» / Д. В. Борисюк. – Житомир, 2020. – 21 с.

Стаття надійшла до редакції 25.06.2021

Стаття пройшла рецензування 28.06.2021.

Борисюк Дмитро Вікторович – к. т. н., асистент кафедри автомобілів та транспортного менеджменту.

Вінницький національний технічний університет.